

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Демиденко Олександр Анатолійович



УДК 621.762 : 621.793

Закономірності формування структури та властивостей порошкових композиційних матеріалів на основі заліза та самофлюсивних сплавів багатофункціонального призначення

05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор

Степанчук Анатолій Миколайович,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Рудь Віктор Дмитрович,

Луцький національний технічний університет, МОН України, професор кафедри прикладної механіки та мехатроніки

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Нешпор Ірина Петрівна

Інститут проблем матеріалознавства НАН України, провідний науковий співробітник

Захист відбудеться “11” травня 2021 р. о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. 9, ауд.203.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “ 6 ” квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12



Степанов О. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Сучасний розвиток промисловості диктує умови створення нових матеріалів та виробів з них, які б поряд з високими значеннями міцності та зносостійкості, мали б стійкість до впливу агресивних середовищ. Вирішенню питань розробки таких матеріалів і теоретичних та технологічних засад їх консолідації присвячені роботи як закордонних, так і вітчизняних вчених. Значний вклад у вирішення цих питань внесли фундаментальні роботи Анциферова В. Н., Баглюка, Г. А., Дорофєєва Ю. Г., Ждановича Г. М., Ковальченка М. С., Маслюка В. А., Скорохода В. В., Штерна М. Б. В їх роботах показано, що під час створення порошкових композиційних матеріалів для роботи у важконавантажених вузлах (інтенсивні ударні навантаження та абразивне зношування), необхідно зважати, що такі матеріали повинні мати високі фізико-механічні характеристики поряд з високими значеннями корозійної стійкості. Це питання вирішують шляхом застосування порошків легованих сталей та високоенергетичних методів їх компактування. Такі методи є енергоємними, складними з технологічної точки зору і не завжди гарантують отримання виробів з регульованою структурою і необхідними експлуатаційними характеристиками.

Ще один з методів отримання конструкційних матеріалів та виробів з них з практично стовідсотковою щільністю – інфільтрація (просочування) пористого порошкового каркаса розплавами металів та сплавів з температурою плавлення нижчою за температуру плавлення матеріалу основи, у нашому випадку заліза та його сплавів. В практиці світової порошкової металургії для просочення виробів на залізній основі найчастіше використовують мідь та сплави на її основі. Це вирішує проблему отримання високощільних виробів, але не дозволяє досягати високих експлуатаційних характеристик.

Остання проблема може бути вирішена за рахунок розробки легкоплавких сплавів для просочення пористих каркасів з температурою плавлення близькою до температури плавлення міді але з більш високими механічними властивостями – високою твердістю та ударною в'язкістю. У цьому відношенні можуть бути перспективними самофлюсивні сплави, особливо на основі заліза (СФЗ). Самофлюсивні сплави на основі заліза при збереженні комплексу властивостей, характерних для самофлюсивних сплавів на основі нікелю та кобальту, які досить широко застосовуються у світі, мають значно меншу вартість, що суттєво впливає на конкурентну спроможність матеріалу.

Аналіз стану проблеми в світі показує, що дані про розробку композиційних матеріалів за участю заліза та самофлюсивних сплавів на основі заліза практично відсутні. Відсутні фундаментальні підходи щодо вибору вихідних матеріалів, умов одержання композитів та виробів з наперед заданими властивостями. Викладене вище свідчить про актуальність та своєчасність обраної проблеми, а її вирішення має велике практичне та наукове значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, КПІ ім. Ігоря Сікорського і мала зв'язок з темами:

- розробка технологічних основ отримання новітніх багатофункціональних порошкових конструкційних матеріалів за участю самофлюсивних сплавів (державний реєстраційний номер 0112U000718);
- створення композиційних матеріалів з самофлюсивних сплавів і відхідних твердих сплавів та покриттів з них, (державний реєстраційний номер 110U002327);
- фізика високотемпературної міцності армованих керамічних матеріалів спеціального, функціонального і біомедичного призначення» (державний реєстраційний номер 0116U003737);
- фізика швидкісного електронно-променевого спікання гомогенних та гетерогенних високотемпературних матеріалів (державний реєстраційний номер 0119U100816).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних та технологічних основ формування структури та властивостей нових порошкових композиційних, конструкційних матеріалів за участю порошків заліза і його сплавів та самофлюсивних сплавів з високими характеристиками міцності, стійкістю проти дії агресивних середовищ та абразивного зношування, що в свою чергу забезпечить оптимізацію умов отримання виробів з них із заданими властивостями та підвищить техніко-економічні показники їх виготовлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- з метою визначення раціональних умов та складу матеріалу для отримання виробів із заданими експлуатаційними властивостями – дослідити процеси компактування вихідних сумішей з різним співвідношенням порошків заліза та самофлюсивних сплавів;
- дослідити процеси взаємодії між складовими та формування структури матеріалу залежно від його складу та умов отримання з використанням сучасних методів дослідження (електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектрального аналізу, мікродюрометрії) з метою виявлення впливу цих факторів на фізико-механічні та експлуатаційні властивості виробів з них;
- дослідити технологічні процеси отримання високоякісних виробів методами пресування та спікання у присутності рідкої фази, спіканням у вакуумі, гарячим ізостатичним пресуванням з використанням результатів вивчення впливу факторів, які найбільш суттєво впливають на формування їх структури та властивостей;
- дослідити властивості матеріалів та провести випробування виробів з них – з метою відпрацювання рекомендацій до їх впровадження у різних галузях промисловості (машинобудування, нафтодобування, хімічна, сільське господарство тощо).

Об'єкт досліджень – порошкові композиційні матеріали на основі заліза та самофлюсивних сплавів багатофункціонального призначення.

Предмет досліджень – закономірності формування структури та властивостей порошкових композиційних матеріалів на основі заліза та

самофлюсивних сплавів під час компактування вихідних порошкових сумішей пресуванням з наступним спіканням, просочуванням та гарячим штампуванням.

Методи дослідження

Під час проведення робіт відповідно до поставлених задач у роботі використовувались сучасні методи визначення характеристик порошкових матеріалів – пористості, щільності, відносного об'єму, усадки при спіканні, дослідження структури матеріалів з використанням світлової та електронної мікроскопії, фазового складу за допомогою рентгеноструктурного та рентгенофазового аналізу, механічних характеристик за допомогою мікродюрметричного аналізу та вимірювання твердості, характеристик міцності, стійкості при терті та газоабразивному зношуванні, корозійної стійкості.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше вивчено процес змочування розплавами самофлюсивного сплаву заліза та його сплавів залежно від температури та часу ізотермічної витримки. Встановлено, що для всіх досліджених систем і умов експерименту кут змочування менший за 90° . Останнє свідчить про наявність змочування в досліджених системах. При цьому за температури $1250\text{--}1300^\circ\text{C}$ практично для всіх досліджених систем кут змочування близький до нуля.

При вивченні змочуваності розплавами СФЗ заліза та його сплавів встановлено вплив на ці процеси ступеня легованості заліза карбідоутворюючими елементами. Збільшення ступеня легованості незначно погіршує змочуваність.

2. Вперше встановлені механізми, що супроводжують процеси взаємодії самофлюсивних сплавів із залізом згідно з якими мають місце гетеродифузійні процеси між фазовими складовими. Відбувається уніполярна дифузія нікелю, хрому, вуглецю та бору відповідно до їх активності у бік заліза з утворенням твердих розчинів та складних карбоборидів заліза. Останнє сприяє утворенню прошарків з поступовою зміною хімічного складу і властивостей.

3. Вперше вивчені процеси компактування композицій Fe – СФЗ пресуванням з наступним спіканням у середовищі водню та вакууму, просочуванням і гарячою штамповкою. Встановлено вплив складу композицій та технологічних параметрів на структуру та кінцеві властивості виробів.

Встановлений механізм спікання, згідно до якого причиною виникнення пористості в матеріалах є тиск газу у закритих порах, який протидіє діючим лапласівським силам. У випадку спікання у вакуумі і просочуванням такі причини відсутні і матеріал має практично стовідсоткову щільність. Матеріали з вмістом 20 мас. % СФЗ мають найвищі механічні характеристики зумовлені їх практично стовідсотковою щільністю, каркасною структурою та наявністю взаємодії між складовими. Умовою отримання таких матеріалів є спікання вихідних пресовок у вакуумі за температури $1150\text{--}1200^\circ\text{C}$ протягом 30 – 45 хв або просочуванням за тих же умов.

4. Вперше встановлені закономірності формування властивостей композиційних матеріалів на основі заліза та самофлюсивних сплавів – твердості та зносостійкості при дії закріплених абразивів і газоабразивному зношуванні. Встановлена їх залежність від складу та структури досліджених композиційних матеріалів. Як наслідок встановлена природа цих властивостей та можливість їх прогнозування. Найбільш стійкими до зношування є матеріали з каркасною

структурою в якій прошарки СФЗ зумовлюють екрануючий вплив на зношування матеріалу основи. Показано, що механічні характеристики та стійкість до зношування перевищують або знаходяться на рівні існуючих зносостійких матеріалів на основі заліза, але мають вартість у 2 – 3 рази меншу.

5. Вперше вивчені процеси корозії матеріалів з композицій Залізо – СФЗ у розчинах сірчаної кислоти. Встановлений механізм корозії. Стійкість досліджених матеріалів до корозії зумовлена високою корозійною стійкістю СФЗ, особливо у тих випадках коли прошарки СФЗ повністю блокують частинки заліза, утворюючи каркасну структуру. Встановлено, що матеріали з вмістом 30 мас. % СФЗ і більше виготовлені пресуванням з наступним спіканням у вакуумі за температур 1200 – 1250 °С протягом 30 – 45 хв. та просочуванням за цих же умов по десятибальній шкалі корозійної стійкості мають 10 балів і відносяться до класу “Дуже стійкі” до корозії.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані фундаментальні дані, які дозволили запропонувати керований механізм взаємодії розплавів самофлюсивних сплавів із залізом та його сплавами, що дозволяє створювати порошкові композиційні матеріали конструкційного призначення та вироби з них з керованою структурою і, прогнозованими експлуатаційними властивостями.

Розроблені матеріали і технології виготовлення виробів з них мають конкурентну спроможність та інвестиційну привабливість завдяки високим експлуатаційним характеристикам та техніко-економічним показникам їх отримання.

Так у результаті виконання роботи був створений конструкційний зносостійкий матеріал на основі заліза та самофлюсивного сплаву на основі заліза з підвищеною стійкістю до агресивних середовищ. Був відпрацьований технологічний режим отримання матеріалу «80 % Залізо – 20 % СФЗ», згідно якого виготовлені робочі елементи масляних насосів роторного типу та проведені їх промислові випробування. Встановлено, що ресурс роботи роторів з матеріалу «80 % Залізо – 20 % СФЗ», отриманого з використанням технологій ПМ на рівні роторів, отриманих методом електроерозійної обробки з термооброблених заготовок зі сталі ХВГ, а собівартість при серійному виробництві в 4 – 6 разів нижче.

З матеріалів розроблених в дисертаційній роботі виготовленні ролики промислових закаточних машин, які сьогодні виготовляються з термообробленого порошкового конструкційного матеріалу ПК40НЗД2Х ГОСТ 28378-89. У результаті випробувань встановлено, що ресурс роботи виробів з матеріалу «80 % Залізо – 20 % СФЗ» в 3 – 5 разів вище ніж в існуючих аналогів.

Під час виконання роботи була відпрацьована методика по вивченню процесів змочування розплавами металів та сплавів твердих поверхонь, зокрема заліза та його сплавів розплавами самофлюсивних сплавів. Вона може бути використана у навчальному процесі та під час проведенні науково-дослідних робіт з вивчення процесів отримання композиційних матеріалів та виробів з них.

Особистий внесок здобувача Автору належить обґрунтування мети та визначення задач роботи. Як самостійно, так і у співавторстві, отримані всі експериментальні дані, представлені у дисертації. Автором розроблені методики

проведення експерименту та обґрунтовано і визначено склад вихідних матеріалів. Проведена обробка результатів отриманих при вивченні процесів ущільнення сумішей порошків та запропоновано аналітичний опис цих процесів. Разом зі Степанчуком А. М. та Румянцевою Ю. Ю. встановлений механізм процесів корозії композиційних матеріалів з каркасною структурою. У співавторстві зі Степанчуком А. М. розроблено новий композиційний матеріал на основі заліза і самофлюсивного сплаву на основі заліза, на який отримано патент на корисну модель.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації були апробовані на 19 конференціях, з них на 18 міжнародних. Зокрема: на міжнародній конференції “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра”, – Київ: НТУУ “КПІ”, 2013 р.; 4-й международной конференции “HighMatTech”. – Киев: 7–11 октября 2013 г.; XIII Всеукраїнській науково-практичній конференції “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра”, – Київ: НТУУ “КПІ”, 2015 р.; 5-й международной конференции “HighMatTech”. – Киев: 5–8 октября 2015 г. (три доповіді); науково-технічній конференції “Нові матеріали і технології в машинобудуванні”, 21-22 травня 2015 р. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5», – Київ: 03 – 05 грудня 2015 р.; International Scientific-Methodological Conference “How to teach material sciences: new approaches and experiences from the mmateng project”, Krakow-Mariupol, July 23, – 2015 р.; міжнародній науково-технічній конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6», – Київ: 01– 03 грудня 2016 р.; міжнародній науково-технічній конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах -6», – Київ: 1–3 грудня 2016 р.; міжнародній науково-технічній конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8», – Київ: 6– 7 грудня 2018 р.; науково-технічній конференції // Book of Abstracts 6th International conference High Math Tech, October 28–30, 2019; міжнародній науково-технічній конференції “Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020”, 28–29 квітня 2020 р.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 26 наукових робіт, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 стаття у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Є.С., 19 тез доповідей, 1 патент України на корисну модель.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 227 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 160 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 30 таблицями та 102 рисунками. Список використаних джерел містить 133 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито актуальність теми дисертації, ступінь розробки проблеми на сьогодні; сформульовано мету та задачі дослідження, обґрунтовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** наведено результати аналізу літературних даних щодо отримання зносостійких порошкових композиційних матеріалів на основі заліза,

які працюють в умовах високих навантажень та дії агресивних середовищ. Вивчено стан проблеми та проведено аналіз праць щодо дослідження властивостей таких матеріалів. Розглянуто основні типи відомих порошкових матеріалів на основі заліза, їх переваги та недоліки. Проаналізовано вплив фізико-механічних властивостей, хімічного складу та структури матеріалів на їх експлуатаційні властивості.

Показано, що ключовими в проблемі створення композиційних матеріалів є змочування, хімічна взаємодія, розчинення компонентів, адгезія на границях фаз, які забезпечують утворення міцного зв'язку. Термодинамічна, хімічна, термомеханічна сумісність фаз визначають працездатність композитів у широкому діапазоні температур.

Проведено аналіз технологічних процесів отримання порошкових композиційних матеріалів з високою щільністю та заданою структурою. Показано, що найбільш придатними для отримання таких матеріалів можуть бути методи пресування з наступним спіканням у присутності рідкої фази у тому числі просоченням, що дає можливість синтезувати матеріали з високою щільністю.

Аналіз літературних даних дав змогу зробити висновок, що проведення досліджень з розробки та оптимізації методів синтезу композиційних матеріалів, вивчення механізмів формування структури та властивостей цих композицій є доцільним.

У другому розділі висвітлено методики дослідження фізико-механічних властивостей, хімічного складу та структури досліджуваних матеріалів.

У роботі поряд із застосовуванням сучасних стандартних методик дослідження матеріалів, удосконалені методики та створено діючі стенди для отримання порошкових шихт, дослідження процесів змочування, стійкості при зношуванні із закріпленими та вільними абразивами.

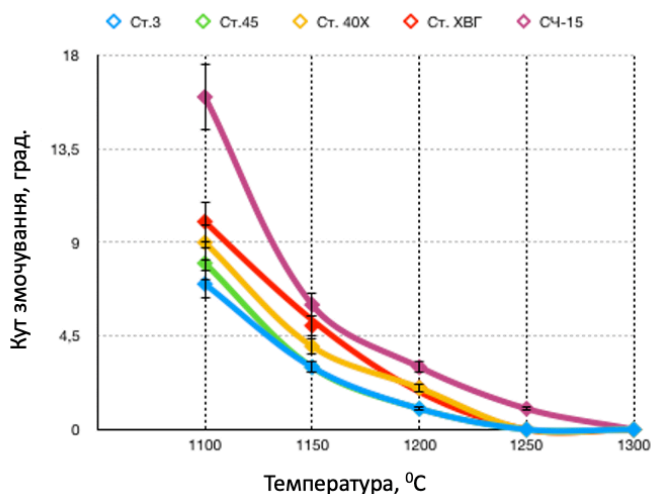


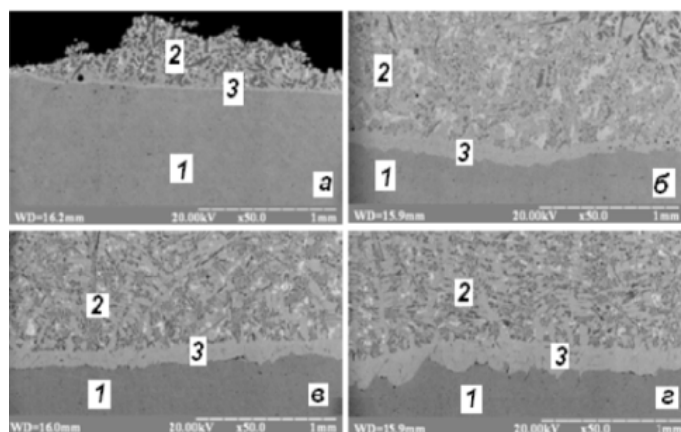
Рис. 1. Залежність кута змочування сталей та чавунів розплавом СФЗ від температури

У третьому розділі наведено результати дослідження змочуваності та взаємодії СФЗ зі сталями та чавунами, які можуть бути використані як основа при створенні композиційних матеріалів на основі заліза.

Встановлено, що для усіх досліджених умов має місце змочуваність (рис. 1). За цих обставин вона покращується зі збільшенням температури та часу ізотермічної витримки. Також встановлено, що на кут змочування впливає вміст вуглецю та ступінь легування сталей.

Кут змочування збільшується зі збільшенням вмісту вуглецю та ступеня легування карбідоутворюючими елементами. Звідси можна зробити висновок, що наявність в сталях як структурної складової карбідів дещо погіршує їх змочуваність розплавами самофлюсивного сплаву на основі заліза.

Дослідження мікроструктури на межі Залізо – СФЗ показали, що між розплавом СФЗ та залізом і його сплавами спостерігається взаємодія. Водночас у межах контакту утворюються нові фазові складові у вигляді прошарків (рис. 2) ширина яких змінюється у залежності від температури та часу ізотермічної витримки. У межах перехідної зони відбувається зміна вмісту елементів (рис. 3).



a – 0 хв; *б* – 10 хв; *в* – 20 хв; *г* – 30 хв
1 – сталь; 2 – СФЗ; 3 – перехідна зона.

Рис. 2. Структура зони взаємодії СтЗ – СФЗ за температури 1100 °С

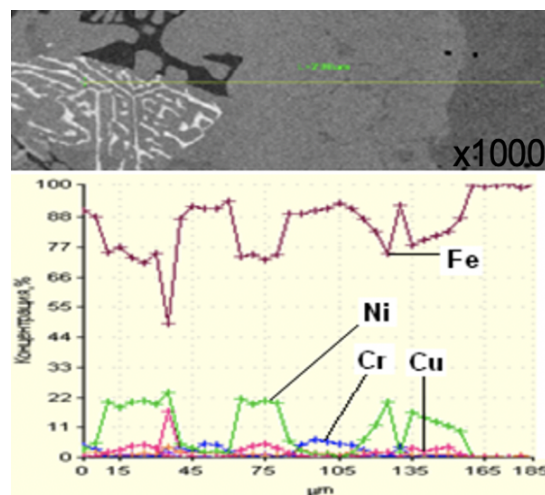


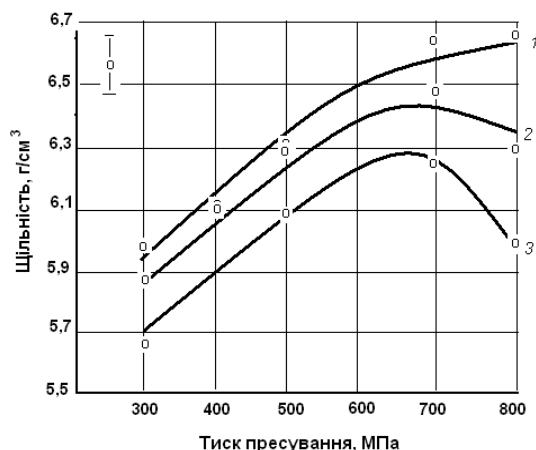
Рис. 3. Розподіл елементів на межі СтЗ – СФЗ за температури 1150 °С, 20 хв

Поблизу перехідних зон у СФЗ відбувається зміна вмісту хрому та нікелю. В той самий час в залізі та його сплавах вміст цих елементів збільшується. Останнє свідчить про те, що нікель та хром, які входять до складу СФЗ дифундують у залізо. Збільшення часу та температури взаємодії сприяє утворенню більш широких проміжних прошарків на межі залізо – СФЗ. Останнє дозволяє зробити висновок, що змінюючи склад та умови отримання композиційних матеріалів, можна отримувати їх з наперед заданими структурою та фазовим складом і, як наслідок, властивостями.

У четвертому розділі викладені результати вивчення процесів компактування заготовок з сумішей порошків заліза і самофлюсивних сплавів пресуванням з наступним спіканням у захисному середовищі та у вакуумі, просочуванням і гарячою штамповкою.

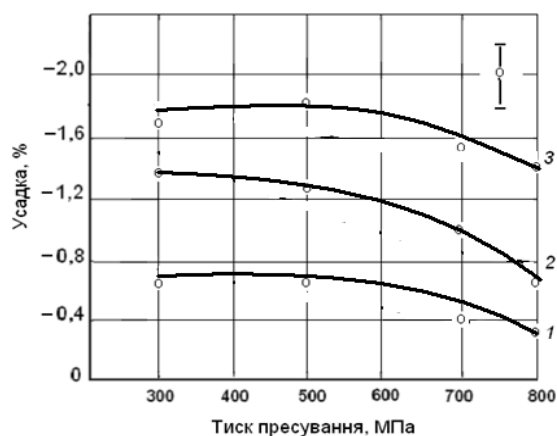
В результаті отримання КМ пресуванням з подальшим спіканням в присутності рідкої фази в середовищі водню було встановлено, що щільність зразків після спікання збільшується зі збільшенням тиску пресування (рис. 4), а для композицій з вмістом СФЗ – 20 та 30 мас.% до тиску 700 МПа збільшується і при збільшенні тиску до 800 МПа знижується.

Після спікання у всіх випадках відбулася від'ємна усадка зразків (рис. 5), а під час дослідження структури виявлено значну пористість (рис. 6). На нашу думку, причиною від'ємної усадки є утворення закритої пористості на початкових стадіях спікання.



1 – 10 мас. % СФЗ; 2 – 20 мас. % СФЗ;
3 – 30 мас. % СФЗ.

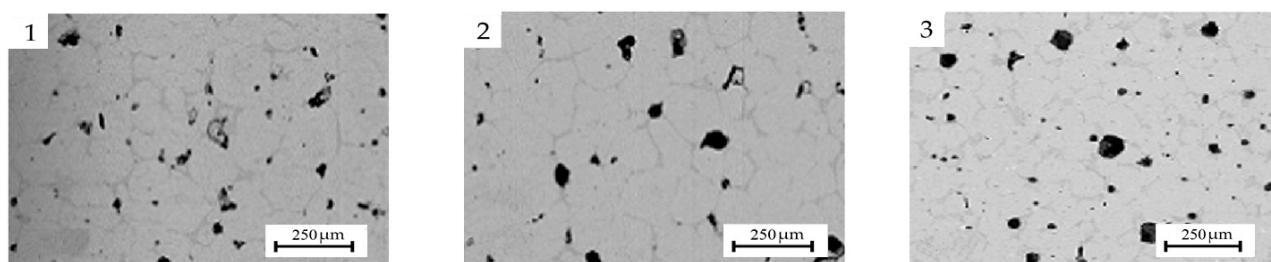
Рис. 4. Залежність щільності спечених пресовок від тиску пресування



1 – 10 мас. % СФЗ; 2 – 20 мас. % СФЗ;
3 – 30 мас. % СФЗ.

Рис. 5. Залежність усадки від тиску пресування

Останнє зумовлено тим, що за температури 1100 °С утворюється рідка фаза з розплаву СФЗ і внаслідок наявності досконалої змочуваності нею частинок заліза миттєво закриваються порові канали, утворюючи пори із захисним газом у середині. З подальшим зростанням температури тиск газу у них збільшується і протидіє діючим лапласівським силам, що приводить до збільшення об'єму пор і, як наслідок, збільшенню об'єму виробу у цілому.

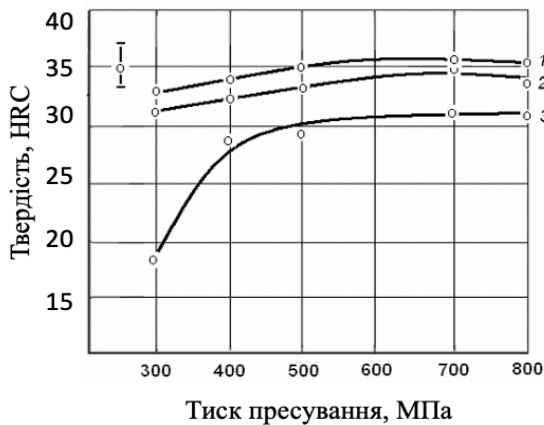


1 – 10 мас. % СФЗ; 2 – 20 мас. % СФЗ; 3 – 30 мас. % СФЗ.

Рис. 6. Мікроструктура матеріалів на основі заліза з різним вмістом СФЗ

З врахуванням процесів, які розглянуті вище, можна пояснити залежність фізико-механічних властивостей від вмісту самофлюсивного сплаву та тиску пресування.

Твердість отриманих матеріалів збільшується зі збільшенням тиску пресування вихідних зразків та збільшенням вмісту в композиції самофлюсивного сплаву (рис. 7). Зі збільшенням тиску пресування твердість зразків зростає до тиску 500 МПа, а далі майже не змінюється. Зі збільшенням відсоткового вмісту в матеріалі самофлюсивного сплаву до 20 % твердість суттєво зростає. З подальшим збільшенням вмісту самофлюсивного сплаву твердість зростає незначно. Її максимальні значення сягають 36 HRC.



1 – 10 мас. % СФЗ; 2 – 20 мас. % СФЗ;
3 – 30 мас. % СФЗ.

Рис. 7. Залежність твердості від тиску пресування

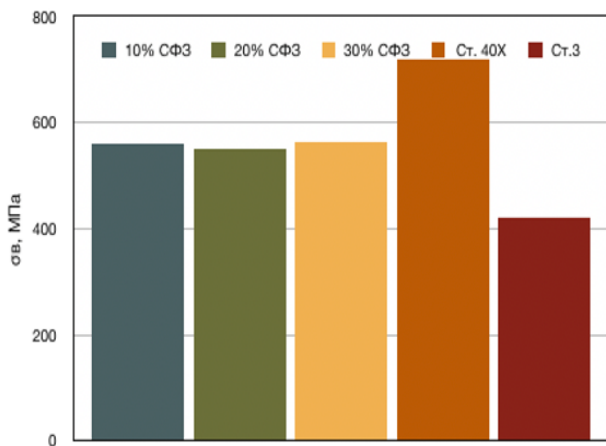
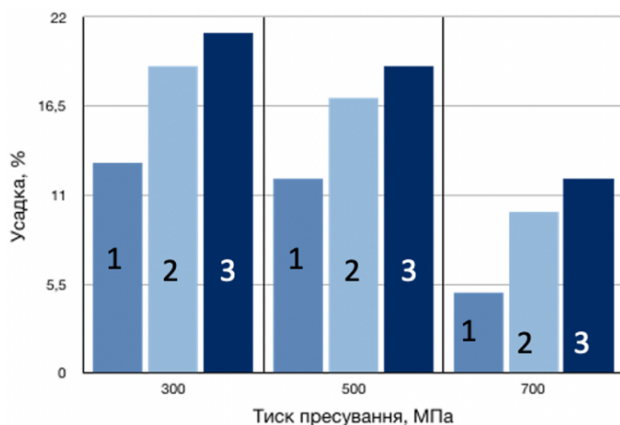


Рис. 8. Порівняння характеристик міцності на розрив, матеріалів з різним вмістом СФЗ зі Ст. 40Х і Ст. 3



1 – 10 мас. % СФЗ; 2 – 15 мас. % СФЗ;
3 – 20 мас. % СФЗ

Рис. 9. Залежність усадки від тиску пресування після спікання у вакуумі 10^{-3} Па

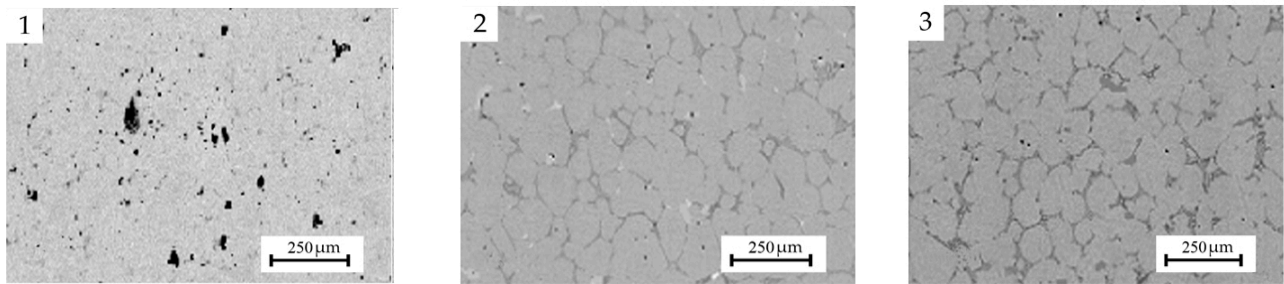
Межа міцності на розрив (рис. 8) залежно від вмісту СФЗ практично залишається незмінною.

Як відомо, характеристики матеріалів багато у чому залежать від якості контактної поверхні між складовими. З однієї сторони збільшення кількості СФЗ, який має значно більшу твердість ніж залізо, призводить до збільшення загальної твердості матеріалу, провокує розчинення домішок, наприклад оксидів заліза, та покращення контактної поверхні, а з іншої сторони збільшення вмісту СФЗ сприяє підвищенню пористості, та збільшенню крихкої складової в матеріалі, що призводить до зменшення властивостей.

Дослідження процесів компактування композиційних матеріалів Fe + СФЗ спіканням у вакуумі. Для виключення фактору тиску газу в закритих порах, у якості середовища спікання обрали вакуум. Спікання зразків проводили у вакуумній печі, тиск газу в камері становить 10^{-3} Па. Температура спікання становила 1200°C , за часу ізотермічної витримки 20 хв. Усадка зразків після спіканні (рис. 9) незалежно від складу матеріалу у всіх випадках позитивна. Найбільша усадка спостерігається для зразків з вмістом СФЗ 15 – 20 мас. %. Результати металографічного дослідження (рис. 10.) таких матеріалів показують їх майже 100% щільність. Зразки з вмістом СФЗ 10 мас. % мають залишкову пористість, що пояснюється недостатньою кількістю рідкої фази для даних умов отримання КМ.

Також слід зазначити, що зі збільшенням тиску пресування значення усадки зменшується. Це пояснюється зменшенням початкової пористості.

Структура матеріалів двофазна. Складові структури можна ідентифікувати, як залізо та самофлюсивний сплав.



1 – 10 мас. % СФЗ; 2 – 15 мас. % СФЗ; 3 – 20 мас. % СФЗ.

Рис. 10. Мікроструктура матеріалів з різним вмістом СФЗ спечених у вакуумі 10^{-3} Па

Дослідження твердості матеріалів спечених у вакуумі показало, що зі збільшенням вмісту СФЗ твердість зразків зростає (рис. 11). Тиск пресування на твердість зразків майже не впливає. Значну роль відіграли умови спікання. Збільшення ступеня відкачки вакууму при спіканні сприяє збільшенню твердості матеріалів.

Висока твердість може бути зумовлена самоармуванням матеріалу за рухунок утворення каркаса із самофлюсивного сплаву, який при високій твердості має досить високу ударну в'язкість. Тому можна передбачити, що утворення такої структури буде сприяти підвищенню загальної твердості матеріалу. Також на високу твердість може впливати наявність у самофлюсивному сплаві вуглецю і бору. Взаємодія останніх із залізом може призводити до утворення його боридів і карбідів, які мають досить високу твердість.

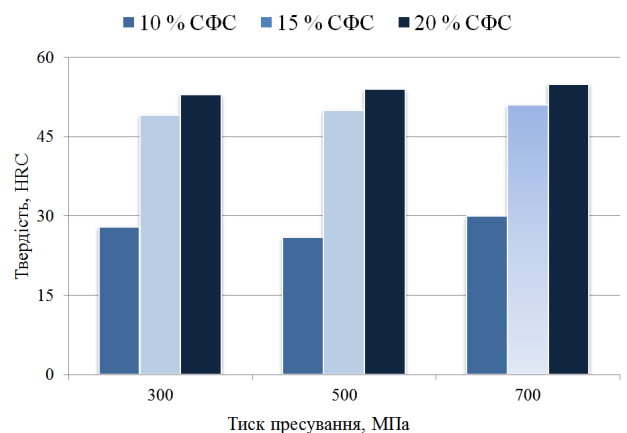


Рис. 11. Твердість матеріалів з різним вмістом СФЗ отриманих за різних тисків пресування

Дослідження процесів компактування композиційних матеріалів Fe + СФЗ просоченням. Враховуючи те, що взаємодія між СФЗ і сталями з утворенням якісного контакту між ними починається за температури 1100 °С і

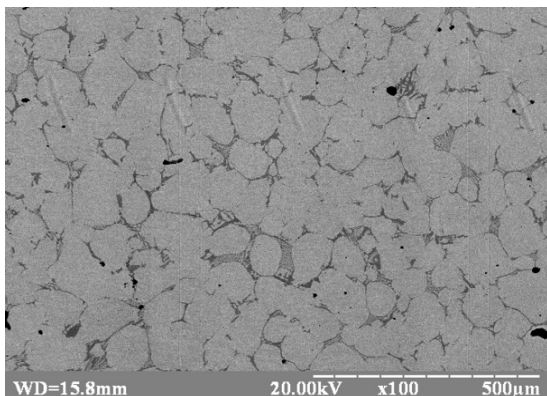


Рис. 12. Мікроструктура композиційного матеріалу Fe + 20 мас. % СФЗ отриманого просочуванням

прискорюється зі збільшенням температури та часу витримки, а за температури > 1250 °С спостерігається плавлення складових, було обрано оптимальний режим просочення за температури 1150 – 1200 °С. Час просочення складав 30 хвилин. Для забезпечення максимально можливого збереження форми та розмірів виробів під час просочення спресовані заготовки спікали за температури 900 °С протягом 15 хв.

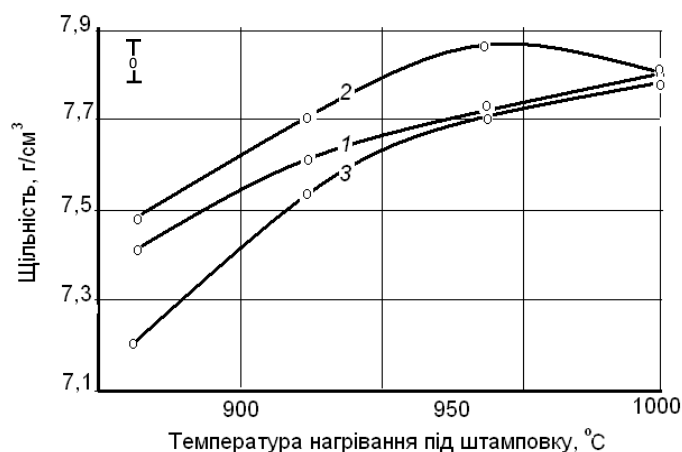
Просочення пористих заготовок проводили знизу, виходячи з передбачення, що під час руху фронту розплаву СФЗ по

капілярах, шлаки, які можуть утворюватися під час взаємодії СФЗ з поверхневими оксидами заліза будуть виводитись на поверхню виробу. Структура отриманих зразків (рис. 12) безпориستا з рівномірно розподіленою фазою СФЗ.

Характеристики міцності отриманих матеріалів сягають рівня конструкційних сталей (табл. 1), що зумовлено, перш за все, їх високою щільністю. Твердість, при однаковому складі, дещо менша, ніж у матеріалів отриманих спіканням у середовищі вакууму. Це може бути зумовлене тим, що у випадку просочування час взаємодії між складовими матеріалу був меншим і, відповідно, меншим був ступінь легування частинок заліза складовими СФЗ, з наступним збільшенням їх твердості.

Останнє підтверджує викладені вище міркування про вплив процесів взаємодії на властивості виробів з досліджуваних сплавів.

Дослідження процесів компактування композиційних матеріалів Fe + СФЗ гарячою штамповкою. Для дослідження отримували зразки пресуванням заготовок на гідравлічному пресі, які нагрівали у муфельній печі у середовищі водню і потім без охолодження ущільнювали штамповкою. Досліджувався вплив температури, часу нагрівання заготовок та енергетичних параметрів гарячої штамповки на ступінь ущільнення матеріалів (рис. 13).



1 – 10 хв; 2 – 30 хв; 3 – 30 хв

Рис. 13. Залежність щільності від температури та часу нагріву під штамповку

розплаву СФЗ, так як температура його плавлення вища за температуру нагрівання заготовок перед штамповкою.

Дослідження структури таких матеріалів показує (рис. 14, 1), що вона двофазна і складається з фази заліза і СФЗ. Пористість практично відсутня. Для підтвердження міркувань щодо впливу структури на властивості матеріалу в роботі

Таблиця 1. Характеристики матеріалів отриманих методом просочення

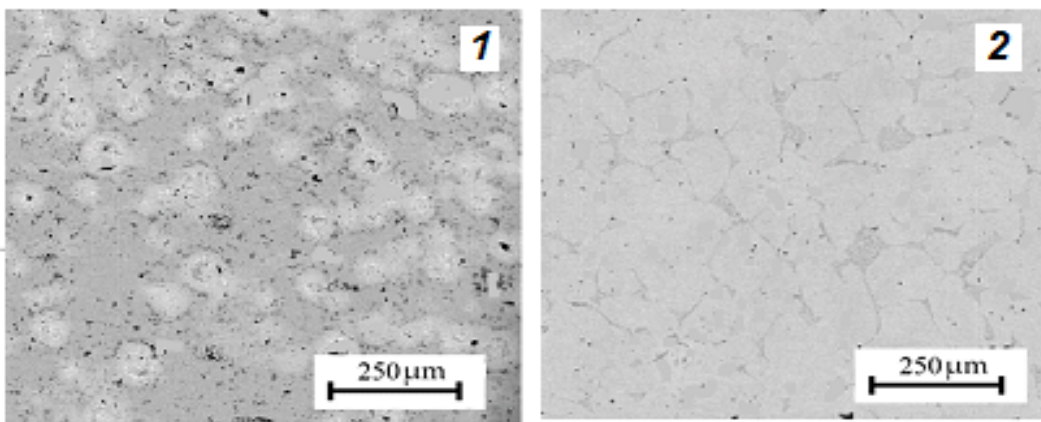
Характеристика	Початкова пористість, %			
	10	15	20	30
Відносна щільність після просочення, %	98	99	98,5	97,2
Усадка, %	1,2	1,4	1,5	2
Твердість, HRC	24	28	42	52
Міцність на згин (σ_z), МПа	1260	1300	1325	1278
Міцність на розрив (σ_v), МПа	620	645	640	615

Аналіз отриманих результатів показує, що на щільність матеріалів при їх отриманні гарячою штамповкою впливає температура нагрівання перед штамповкою, час нагрівання та вихідна пористість. Встановлено, що оптимальна температура нагріву становить від 900 °C до 950 °C, за часу витримки складає 20 хвилин.

Порівняння твердості матеріалів отриманих штамповкою з матеріалами отриманими іншими методами то вона у штампованих значно нижча. Це може бути пояснене тим, що під час гарячої штамповки не утворювалась рідка фаза з

були проведені дослідження впливу термообробки матеріалів на їх структуру та властивості.

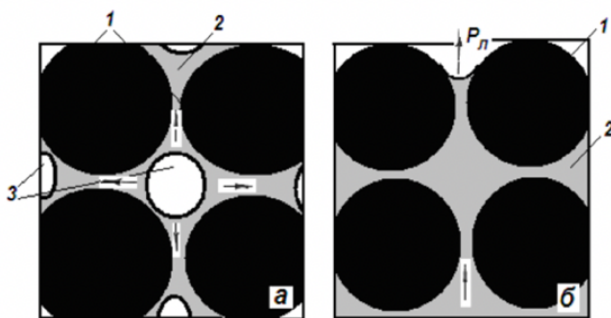
Аналіз отриманих результатів свідчить, що під час нагрівання зразків за температури 1200 °С відбувається плавлення фазової складової з СФЗ (рис. 14, 2) і проникнення її по межах зерен між частинками заліза. Разом з тим, ступінь проникнення залежить від часу ізотермічної витримки. Максимальне проникнення розплаву СФЗ між зернами і утворення каркасних структур подібних до структур, які утворюються під час компактування матеріалів пресуванням з наступним спіканням в середовищі водню або у вакуумі має місце тільки за ізотермічних витримок більших за 90 хвилин. Останнє може бути зумовлене тим, що силам міграції, які виникають під час проникнення розплаву СФЗ між частинками заліза необхідно переборювати зв'язки, які виникли між частинками під час нагрівання зразків перед штамповкою і в ході самої штамповки.



1 – до відпалу; 2 – після відпалу

Рис. 14. Мікроструктура матеріалу отриманого методом гарячої штамповки

Проведення аналізу результатів досліджень різноманітних технологій отримання КМ показало, що на процеси, які протікають під час спікання переважний



1 – частинки заліза; 2 – розплав СФЗ;
3 – пори;

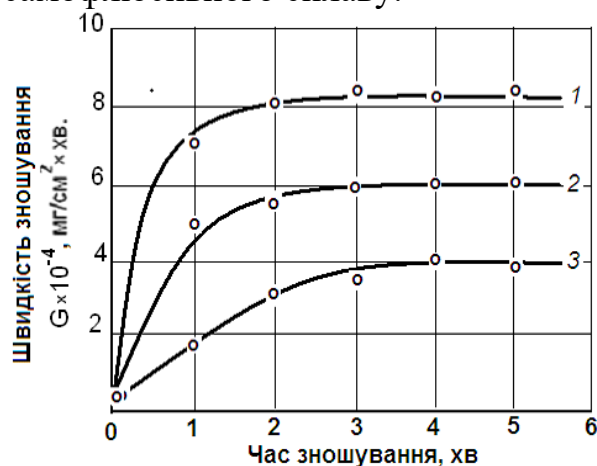
a – суміш, *б* – просочення

Рис. 15. Схема спікання КМ: Fe – СФЗ

вплив несе співвідношення лапласівського тиску ($P_{\text{лап}}$) до тиску газу у закритих порах ($P_{\text{газ}}$). У випадку, коли $P_{\text{лап}} < P_{\text{газ}}$ (спікання КМ у захисному середовищі) спостерігається об'ємний ріст зразків (рис. 15, *a*), за $P_{\text{лап}} > P_{\text{газ}}$ (спікання КМ у середовищі вакууму) відбувається об'ємна усадка. Це підтверджується результатами досліджень процесу спікання просоченням пористого каркаса з порошку заліза розплавом СФЗ. При отриманні зразків просоченням закриті пори не утворюються за рахунок направленої поступового заповнення капілярів розплавом СФЗ (рис. 15, *б*).

У шостому розділі наведені результати дослідження експлуатаційних характеристик досліджуваних матеріалів. Досліджувалась стійкість матеріалів при зношуванні у парі з закріпленими абразивами та при газоабразивному зношуванні, а також корозійна стійкість у розчинах сірчаної кислоти.

Дослідження зносостійкості під час тертя в парі із закріпленим абразивом. Дослідження зносостійкості під час тертя в парі із закріпленим абразивом показало, що величина зношування збільшується зі зменшенням в матеріалі вмісту СФЗ (рис. 16), що пояснюється більш високими значеннями зносостійкості самофлюсивного сплаву.



1 – 10 мас. % СФЗ; 2 – 20 мас. % СФЗ;
3 – 30 мас. % СФЗ

Рис. 16. Залежність швидкості зношування зразків з різним вмістом СФЗ від часу зношування

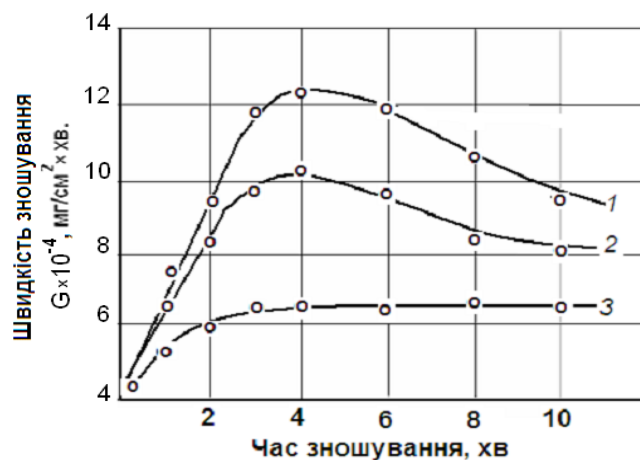
збільшенням часу взаємодії між компонентами КМ з утворенням проміжного прошарку з поступовою зміною вмісту елементів в ньому і, як наслідок, зміною властивостей.

Останнє, як відомо, призводить до збільшення показників механічних властивостей матеріалів в цілому і, як наслідок, збільшенню їх зносостійкості, що і спостерігається у нашому випадку.

Окрім цього, під час спікання матеріалів, залежно від методу їх отримання, утворюється каркас зі зносостійкого СФЗ в його структурі, яке є перпоною для різальних елементів – абразивних зерен. У цьому випадку шлях різання є не суцільним, а дискретним, що у свою чергу сприяє зменшенню зношування матеріалу. Ці міркування підтверджують результати досліджень зносостійкості матеріалів отриманих

Вивчення впливу пористості на зношування матеріалів залежно від часу зношування (рис. 17) показує, що на початкових етапах швидкість зношування збільшується зі збільшенням пористості, а для матеріалів, які мають більшу пористість має екстремальний вигляд. Вона спочатку зростає, а потім знижується, що зумовлено заповненням пор продуктами тертя, які мають високу зносостійкість. Також заповнення пор збільшує поверхню тертя і, як наслідок, зменшується тиск на матеріал.

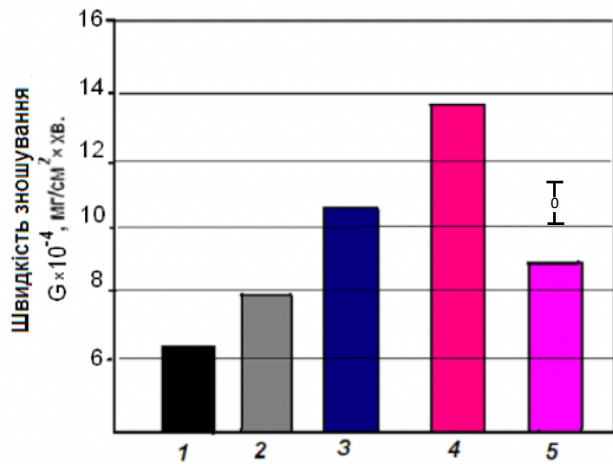
Дослідження впливу технологічних факторів на зносостійкість матеріалів показало, що дієвим фактором є час ізотермічної витримки під час спікання. Його збільшення призводить до зменшення зношуваності матеріалів, що зумовлено



1 – 6,8%; 2 – 4,20%; 3 – 1,2%

Рис. 17. Залежність швидкості зношування зразків з різною пористістю від часу зношування

методом гарячого штампування (рис. 18). Попри однаковий вміст СФЗ, у порівнянні з матеріалами отриманими іншими методами, вони мають меншу зносостійкість. Це зумовлено тим, що в таких матеріалах не утворюється каркасна структура. СФЗ знаходиться в матеріалі у вигляді окремих включень (рис. 14, 1). В той самий час, відпал зразків після гарячої штамповки за температур вищих ніж температура плавлення СФЗ сприяє отриманню структури матеріалу в якій СФЗ прогресує до утворення каркаса шляхом утворення рідкої фази і проникнення її між частинками заліза (рис. 14, 2), і як наслідок показники зносостійкості значно покращуються.



1 – Пресування зі спіканням у вакуумі;
2 – просоченням; 3 – пресування зі спіканням у водні;
4 – гаряча штамповка; 5 – гаряча штамповка з подальшим відпалом у водні.

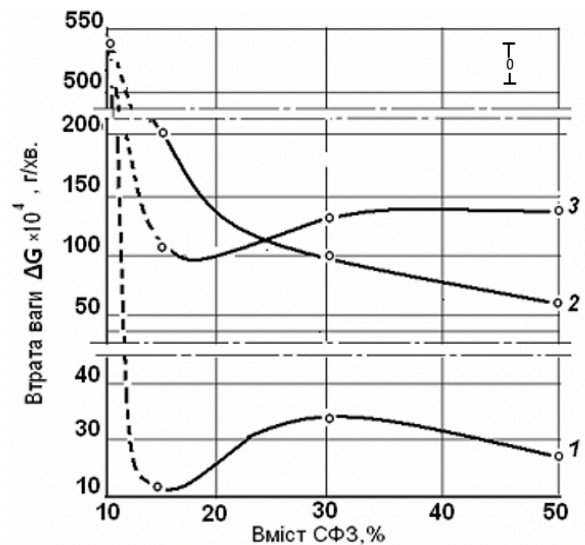
Рис. 18. Швидкість зношування матеріалів отриманих різними технологіями

збільшення його товщини.

Встановлена залежність зносостійкості від кута атаки струменя абразиву (рис. 19). При куті атаки 30 – 45 ° швидкість зношування для сталевго еталона має максимум, і мінімум при 90 °. Останнє може бути пояснене тим, що чим менший кут, між вектором швидкості струменя і площиною поверхні, тим більше тангенціальна складова швидкості і тим більший вплив дряпання часток абразиву на відносно м'яку сталеву поверхню, що узгоджується з існуючими уявленням щодо процесів абразивного зношування. Разом з тим, під час дослідженні грубогетерогенних композицій, як це має місце у нашому випадку, пік зношування припадає на 90 ° і збільшенні вмісту СФЗ.

Дослідження зносостійкості матеріалів при газоабразивному зношуванні.

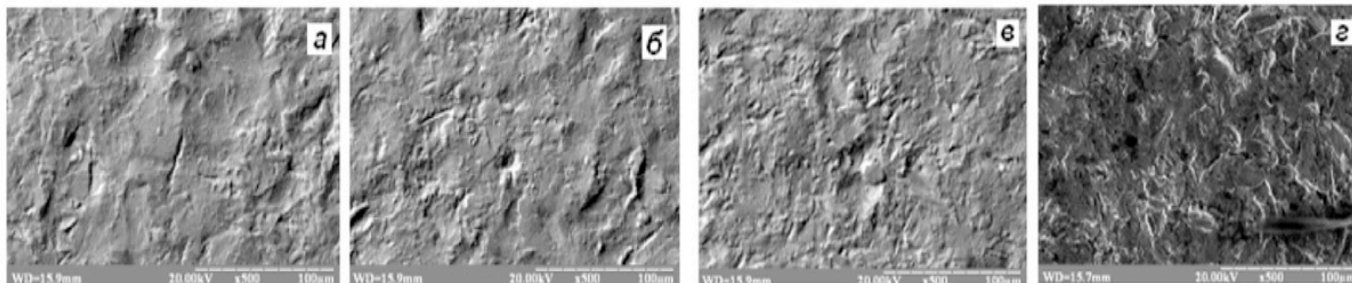
Встановлено, що стійкість до абразивного зношування залежить від складу матеріалу, методу отримання та технологічних параметрів компактування. Так збільшення вмісту самофлюсивного сплаву в композиційному матеріалі, зменшення його пористості, наявність взаємодії між фазовими складовими сприяє збільшенню його стійкості до абразивного зношування. Показано, що збільшенню зносостійкості сприяє утворення в структурі матеріалу суцільного каркаса з СФЗ та



1 – 15 °; 2 – 45 °; 3 – 90 °

Рис. 19. Залежність втрати ваги від вмісту СФЗ за різних кутів атаки газоабразивного струменя

Вивчення залежності зношування від часу випробувань показує, що спочатку інтенсивність зношування зростає, а потім зменшується. Такий характер процесу пояснюється тим, що спочатку відбувається інтенсивне зношування пластичної фази заліза з утворенням виступів фази СФЗ (рис. 20). Надалі ці виступи екранують поверхню фазової складової заліза і, тим самим, зменшується зношування композиції в цілому.



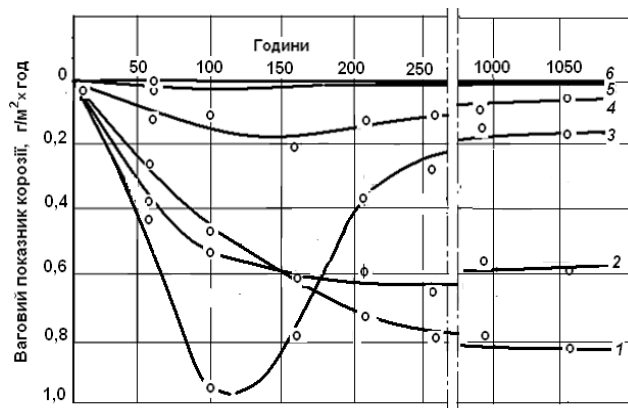
a – 15 мас. % СФЗ; *б, г* – 30 мас. % СФЗ; *в* – 50 мас. % СФЗ.

Рис. 20. Структура поверхні зносу зразків з різним вмістом СФЗ за кута атаки газоабразивного струменя 45° (*a, б, в*) та 90° (*г*)

Вивчення корозійної стійкості матеріалів з композицій Fe – СФЗ

З метою визначення оптимального складу матеріалу для роботи в умовах корозійного середовища досліджувалась корозійна стійкість матеріалів з композицій Fe – СФЗ з різним вмістом останнього (рис. 21).

Сплави, які мають гетерофазну мікроструктуру з дискретними включеннями фази СФЗ інтенсивно кородують, особливо на початковій стадії.



1 – 0 мас.%; 2 – 15 мас.%; 3 – 30 мас.%;
4 – 40 мас.%; 5 – 50 мас.%; 6 – 60 мас.%.
Рис. 21. Залежність вагового показника корозії від часу крозії та вмісту СФЗ у 30 % розчині сірчаної кислоти

Рис. 21. Залежність вагового показника корозії від часу крозії та вмісту СФЗ у 30 % розчині сірчаної кислоти

Збільшення тривалості корозії призводить до зниження інтенсивності корозії, а зі збільшенням в сплаві вмісту СФЗ інтенсивність корозії значно зменшується, як на початковій стадії, так і надалі. Для сплавів з вмістом СФЗ 50 %, особливо за часу корозії понад 250 год., процес корозії відбувається подібно до корозії чистого СФЗ, які у досліджених умовах кородують дуже повільно.

Збільшення корозійної стійкості сплавів з вмістом СФЗ більше ніж 30 % може бути зумовлене відносним збільшенням фазової складової, яка в досліджених умовах практично не

кородує. У таких сплавах, як було зазначено вище, фазова складова з СФЗ утворює суцільний каркас, який відокремлює зерна заліза одне від одного як у площині поверхні так і в глибину. Така структура може значно зменшувати міжфазову поверхню, яка бере участь в електрохімічних процесах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано дані по розробці порошкових матеріалів на основі заліза конструкційного призначення, які працюють в умовах дії високих навантажень, абразивного зношування та дії корозійних середовищ. Встановлено, що перспективними для створення таких матеріалів і виробів з них є композиції із заліза та самофлюсивних сплавів на основі заліза. Для виготовлення виробів з таких матеріалів найбільш доцільно застосовувати методи порошкової металургії: пресування з наступним спіканням у присутності рідкої фази та просочуванням пористих каркасів із заліза розплавами самофлюсивних сплавів.

2. Досліджені процеси змочування та взаємодії між залізом та його сплавами з розплавами СФЗ. Встановлено, що для всіх досліджених систем за температур 1250 – 1300 °С кут змочування близький до нуля. Встановлено, що під час взаємодії СФЗ із залізом та його сплавами відбувається уніполярна дифузія нікелю та хрому з СФЗ в залізо, яка сприяє утворенню перехідних прошарків, та легуванню заліза поблизу перехідних зон. Наявність змочування і взаємодії гарантує якісний контакт між складовими КМ по границях зерен і сприяє підвищенню фізико-механічних характеристик. Збільшення ступеня легованості сталей карбідоутворюючими елементами дещо погіршує їх змочуваність, що узгоджується з сучасними уявленнями про змочуваність карбідів.

3. Досліджено вплив методу компактування матеріалів із композицій залізо – СФЗ на формування структури та властивостей. Встановлені механізми спікання досліджених матеріалів, згідно з якими причиною залишкової пористості в спечених матеріалах є тиск газу в закритих порах, який протидіє діючим лапласівським силам. Показано, що максимальні фізико-механічні характеристики матеріалу досягаються при формуванні каркасної структури та високої щільності. Умовою формування каркасної структури є вміст в матеріалі не менше 20 мас. % СФЗ, температура спікання 1150 – 1200 °С, час спікання 30 – 45 хв, а оптимальні технології компактування згідно яких досягається максимальна щільність – пресування з наступним спіканням у вакуумі та просочування. Останнє зумовлено тим, що у цьому випадку відсутні фактори, які протидіють лапласівським силам.

4. Досліджена стійкість до абразивного зношування матеріалів з композицій Fe – СФЗ в умовах дії закріплених та вільних абразивів. Показано, що змінюючи вміст СФЗ та умови отримання матеріалу можна змінювати їх стійкість до абразивного зношування. Показано, що збільшенню зносостійкості сприяє утворення в структурі матеріалу суцільного каркаса з СФЗ.

5. Досліджена кінетика корозійної стійкості. Показано, що корозійна стійкість змінюється залежно від складу композиції та часу корозії. Встановлено, що композиції з вмістом самофлюсивного сплаву до 30 мас. % за 10-ти бальною шкалою оцінювання загальної корозійної стійкості матеріалів відносяться до стійких, а з вмістом СФЗ більшим за 30 мас. % дуже стійких.

Запропоновано механізм корозії досліджених матеріалів, згідно якому збільшення вмісту СФЗ та утворення у матеріалі каркаса з СФЗ, який є дуже стійким у розчинах кислот і ізолює фазу заліза від контакту з розчином кислоти, визначає швидкість корозії матеріалу у цілому.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Конструкційні порошкові матеріали на основі заліза за участю самофлюсівних сплавів / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, А. В. Демиденко, К. В. Шаповал // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2012. – № 1. – С. 51 – 60. *Демиденко О.А. – приймав участь у проведенні досліджень, обробці та обговоренні результатів досліджень, написанні статті.*

2. Степанчук А. М. Вплив складу та структури сплавів залізо самофлюсівний сплав на їх корозійну стійкість у розчинах сірчаної кислоти / А. М. Степанчук, Ю. Ю. Румянцева, **О. А. Демиденко** // Луцьк : Наукові нотатки, ЛДУ, 2016. – № 56. – С. 154 – 161. *Демиденко О.А. – приймав участь у проведенні досліджень, обговоренні отриманих результатів.*

3. **Демиденко О. А.** Стійкість порошкових матеріалів із композицій залізо-самофлюсівний сплав при газоабразивному зношуванні / **О. А. Демиденко**, А. М. Степанчук // Проблеми тертя та зношування: – К. : Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2016. – № 4 (73). – С. 65 – 74. *Демиденко О.А. – приймав участь у проведенні досліджень, обробці та обговоренні отриманих результатів досліджень, написанні статті.*

4. Степанчук А. М. Зносостійкість при терті в парі з закріпленим абразивом композиційних матеріалів на основі заліза і самофлюсівних сплавів / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, А. О. Клеков // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – № 1. – С. 87 – 93. *Демиденко О.А. – приймав участь у проведенні досліджень, обробці та обговоренні результатів досліджень, написанні статті.*

5. Степанчук А. М. Залежність механічних властивостей порошкових матеріалів із композицій залізо-самофлюсівний сплав від методу їх отримання / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, С. Ю. Тесля // Луцьк, Наукові нотатки, ЛДУ, 2020. – № 69. – С. 18 – 23. *Демиденко О.А. – приймав участь у проведенні досліджень, обробці та обговоренні результатів досліджень, написанні статті.*

6. Demydenko Oleksandr, Stepanchuk Anatolii. Influence of composition and technological factors of obtaining compositional materials of iron-self-flusive alloy on physico-mechanical characteristics // Materials Science and Technology European Science. – 2/2020. – P. 126 – 131 (ЄС, Словаччина). *Демиденко О.А. – приймав участь у проведенні досліджень, обробці та обговоренні результатів досліджень, написанні статті.*

Патенти:

7. Деклараційний патент UA№ 106348 U2015 09875, C22C 38/00. Композиційний матеріал на основі заліза легований самофлюсівним сплавом / Степанчук А. М., Демиденко О. А., 01.12.2017; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8, 2016.

Матеріали конференцій:

8. Конструкційні порошкові матеріали на основі заліза за участю самофлюсівних сплавів / А. М. Степанчук, В. Г. Матяшов, **О. А. Демиденко**, М. М. Велідченко // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах - 3». – К. : НТУУ «КПІ», ІФФ. – 2010. – С. 39 – 44.

9. **Демиденко О. А.** Вплив методу компактування на структуру та властивості порошкових матеріалів на основі заліза та самофлюсівних сплавів / **О. А. Демиденко**, А. М. Степанчук, К. В. Шаповал // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 3», – К. : 20 – 21 листопада 2012. – С. 29 – 34.

10. Використання самофлюсівних сплавів при створенні композиційних матеріалів та покриттів [Електрон. ресурс] / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, Л. О. Бірюкович, М. Б. Шевчук // Матеріали міжнародної конференції “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра”, – К. : НТУУ “КПІ”, 2013, – С. 454 – 465.

11. Степанчук А. Н. Стойкость при газоабразивном износе композиционных материалов с участием отходов твердых сплавов и самофлюсующихся сплавов на основе железа / А. Н. Степанчук, М. Б. Шевчук, М. Н. Велідченко, **А. А. Демиденко** // Труды III-ей международной Самсоновской конференции “Материаловедение тугоплавких соединений”, Киев, Украина, 23 – 25 мая 2012 г. – С. 88.

12. Отримання покриттів на ливарних виробках з використанням самофлюсівних сплавів / М. Б. Шевчук, А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, В. М. Смик // Матеріали У Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении – 2013». – К. : НТУУ “КПИ”. – 2013. – С. 119 – 120.

13. **Демиденко А. А.** Влияние метода компактирования на структуру и свойства порошковых материалов на основе железа и самофлюсующихся сплавов. / **А. А. Демиденко**, А. Н. Степанчук // Труды 4-й междунар. конф. “HighMatTech”. – К. : ИПМ НАНУ. – 2013. – С. 162.

14. Порошкові конструкційні матеріали на основі заліза та самофлюсівних сплавів отримані спіканням у присутності рідкої фази / **О. А. Демиденко**, К. О. Шаповал, М. С. Зубрейчук, А. П. Воробей // Матеріали у Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении – 2013». – К. : НТУУ “КПИ”. – 2013, – С. 25 – 26.

15. Степанчук А. Н. Закономерности получения материалов и толстослойных покрытий на основе композиций твердые тугоплавкие соединения – самофлюсующийся сплав / А. Н. Степанчук, М. Б. Шевчук, **А. А. Демиденко** – М. : Цветные металлы. – 2014. – № 1. – С. 63 – 68.

16. Корозійна стійкість сплавів залізо-самофлюсівний сплав у розчинах сірчаної кислоти / Ю. Ю. Румянцева, А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, Т. В. Севернюк // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 21 квітня 2015 р. / [редкол.: В. С. Богушевський (відпов. ред.) та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – С. 751 – 767.

17. Степанчук А. Н. Взаимодействие расплавов самофлюсующихся сплавов с железом / А. Н. Степанчук, **А. А. Демиденко**, А. А. Клеков // Труды 5-й междунар. конф. “HighMatTech”. – К. : ИПМ НАНУ. – 2015. – С. 202.

18. Степанчук А. Н. Изнашивание композиционных материалов на основе железа в условиях газобразивного воздействия / А. Н. Степанчук, **А. А. Демиденко**, В. М. Смык, О. В. Савчук // Труды 5-й междунар. конф. “HighMatTech”. – К. : ИПМ НАНУ. – 2015. – С. 113.

19. Стойкость против коррозии сплавов железо-самофлюсующийся сплав в растворах серной кислоты / А. Н. Степанчук, Ю. Ю. Румянцева, Т. В. Севернюк, **А. А. Демиденко** // Труды 5-й междунар. конф. “HighMatTech”. – К. : 6–8 октября 2015. – С. 112.

20. Степанчук А. М. Стійкість порошкових матеріалів із композицій залізо–самофлюсівний сплав при газобразивному зношуванні / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, В. М. Смик // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5», – К. : НТУУ «КПІ». – 2015. – С. 78 – 82.

21. Степанчук А. М. Вплив методу компактування порошкових матеріалів на основі заліза та самофлюсівних сплавів конструкційного призначення на їх структуру і властивості / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, Ю. Ю. Румянцева // International Scientific-Methodological Conference “How to teach material sciences: new approaches and experiences from the mmateng project”, Krakow-Mariupol, July 23, – 2015. – S. 110–114.

22. Вплив пористості на корозійну стійкість порошкових композиційних матеріалів за участю заліза та самофлюсівних сплавів / Ю. Ю. Румянцева, А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, Т. В. Севернюк // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6», – Київ: 01–03 грудня 2016. – С. 98 – 101.

23. Степанчук А. М. Змочування та взаємодія розплавів самофлюсівних сплавів заліза та його сплавів. / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко**, Л. М. Лопушанська // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах -6», – Київ: 1–3 грудня 2016. – С. 106 – 109.

24. **Демиденко О. А.** Вплив методу отримання композиційних матеріалів на основі заліза легованого самофлюсівним сплавом на їх твердість / **О. А. Демиденко**, А. М. Степанчук // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8», – Київ: 6–7 грудня 2018. – К. : НТУУ «КПІ». – 2018. – С. 33 – 37.

25. Stepanchuk A. M. Research of the physical and mechanical properties of composite materials based on iron and self-fluxing alloy / A. M. Stepanchuk, **О. А. Demydenko** // Book of Abstracts 6th International conference HighMathTech, October 28–30, 2019, Kyiv, Ukraine. – К. : IPM NANU. – 2019. – С. 83

26. Степанчук А. М. Про природу властивостей порошкових матеріалів на основі композицій залізо-самофлюсівний сплав / А. М. Степанчук, **О. А. Демиденко** // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції “Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020”, 28–29 квітня 2020 р. – К. : НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». – 2020. – С. 116 – 119.

АНОТАЦІЯ

Демиденко О. А. Закономірності формування структури та властивостей порошкових композиційних матеріалів на основі заліза та самофлюсивних сплавів багатofункціонального призначення.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали. – Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, 2021 р.

Робота присвячена встановленню закономірностей формування структури, фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик композиційних матеріалів залізо – СФЗ отриманих з використанням різноманітних технологій порошкової металургії.

В роботі досліджені процеси змочування заліза та його сплавів розплавами самофлюсивних сплавів на основі заліза. Встановлено, що СФЗ змочує залізо і його сплави починаючи з температури 1100 °С, а між сталями та СФЗ відбувається взаємодія з утворенням нових фазових складових у вигляді прошарків.

Встановлений механізм спікання досліджуваних матеріалів, згідно якого причиною залишкової пористості в спечених матеріалах є тиск газу в закритих порах, який протидіє діючим лапласівським силам.

Найбільші значення фізико-механічних характеристик спостерігаються для матеріалів, що мають каркасну структуру та вміст самофлюсивного сплаву на основі заліза у межах 20 %.

Встановлено, що кращі показники зносостійкості та корозійної стійкості мають матеріали з вмістом самофлюсивного сплаву на основі заліза 20 – 30 % та сотовою структурою.

Ключові слова: композиційний матеріал; самофлюсивний сплав; змочування; сотова структура; високоенергетичні методи; лапласівські сили; абразивне зношування; корозійна стійкість.

ABSTRACT

Demydenko O. Regularities of formation of structure and properties of powder composite materials on the basis of iron and self-fluxing alloys of multipurpose function.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.16.06 - powder metallurgy and composite materials. – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2021

The work is devoted to the establishment of regularities of structure formation, physical and mechanical properties and operational characteristics of composite materials iron - self - fluxing multifunctional alloy obtained using various technologies of powder metallurgy.

The processes of wetting iron and its alloys with melts of self-fluxing iron-based alloys are investigated in the work. It is shown that the melt of the self-fluxing alloy wets the surfaces of iron and its alloys. Increasing the degree of alloying of steels impairs their wettability, due to the presence of carbides, which are known to impair wettability. Between steels and self-fluxing iron-based alloys there is an interaction with the formation of new phase components in the form of layers, the width of which depends

on the temperature and interaction time. Also, the width of the layers is affected by the degree of alloying of steels, with increasing degree of alloying decreases the degree of interaction between the components.

The presence of interaction is confirmed by the change in the content of elements near the transition zones. In self-fluxing alloys based on iron, the content of chromium and nickel changes - it decreases, and in iron and its alloys the content of these elements increases.

The processes of compaction of composite material using various technologies of powder metallurgy are studied. It is established that in the materials obtained by pressing followed by sintering in a protective medium, porosity is present as a phase component, caused by the formation of closed porosity at the initial stages of sintering. The mechanism of sintering of the investigated materials is established, according to which the cause of residual porosity in sintered materials is the gas pressure in closed pores, which counteracts the acting Laplace forces.

The influence of technological parameters of compaction and composition of composite materials based on iron and self-fluxing alloys based on iron on the formation of the final structure is established. Self-fluxing alloy based on iron, which during sintering is in the liquid phase during crystallization forms layers between parts of the iron powder. With a self-fluxing alloy content of 20% or more, a frame structure is formed. Increasing the content of self-fluxing alloy increases the hardness. The high hardness is due to the fact that in the sintering process there was a self-reinforcement due to the formation of a frame of self-fluxing alloy, which at high hardness has a fairly high impact strength.

The study of mechanical characteristics shows that with increasing content of self-fluxing alloy for materials obtained by pressing followed by sintering in a protective environment, the tensile strength decreases, and the tensile strength remains virtually unchanged. It is known that the characteristics of materials largely depend on the quality of the contact surface between the components. On the one hand, increasing the amount of self-fluxing alloy provokes the dissolution of impurities, such as iron oxides, and improving the contact surface, and on the other hand, increasing the content of the brittle component reduces the overall strength of the material and consequently compensates for the properties. The highest values of physical and mechanical characteristics are observed for materials with a frame structure and the content of self-fluxing alloy based on iron within 20%.

Some operational properties of materials are studied. It is established that the resistance to wear with a fixed abrasive, in the conditions of gas-abrasive wear, resistance to corrosion depend on the method of obtaining materials, their composition and structure. The best indicators of wear resistance and corrosion resistance have materials with a content of self-fluxing alloy based on iron 20 – 30 % and honeycomb structure.

In addition, as mentioned above, when sintering materials, depending on the method of obtaining them in its structure, a framework of wear-resistant self-fluxing alloy is formed, which is an obstacle to the action of abrasives and aggressive media.

Keywords: composite material, self-fluxing alloy; wetting; honeycomb structure; high-energy methods; Laplace forces; abrasive wear; corrosion resistance.